

面向飞行器电磁散射特征诊断的近场频域成像算法^{*}

贾高伟, 阴 鹏, 邵 帅
(国防科技大学 空天科学学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 无人机在结构样式和材料构成方面具有的灵活性使得其相比有人机具有更大的隐身性能优化空间, 在室内或者室外开展近场成像变得迫切。结合飞行器转台成像几何模型建立了近场转台成像通用信号模型, 提出了一种面向飞行器电磁散射特征诊断的近场频域成像算法, 在子孔径成像设置约束下, 近似将斜距平面频谱按照水平面频谱处理; 分析了该算法适用的条件, 并围绕典型近场成像几何和飞行器尺寸生成仿真数据, 在 0.6 ~ 35 GHz 范围内选择典型波段完成近场成像, 良好的成像结果证实了理论分析与所提算法的正确性。

关键词: 飞行器; 近场成像; SAR 成像; 转台模型
中图分类号: TN95 **文献标志码:** A **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**
文章编号: 1001-2486(2023)06-010-10



Near-field frequency domain imaging algorithm about the aircraft's scattering characteristics diagnosis

JIA Gaowei, YIN Peng, SHAO Shuai
(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The flexibility of UAV in structural style and material composition makes it have more space for stealth performance optimization than the manned aircraft, so it was urgent to carry out near-field imaging indoors or outdoors. Based on the imaging geometry model of aircraft turntable, a general signal model of near-field turntable imaging was established, and a near-field frequency-domain imaging algorithm for aircraft electromagnetic scattering feature diagnosis was proposed. Under the constraint of sub aperture imaging setting, the slant plane spectrum was approximately processed as the horizontal plane spectrum; the applicable conditions of the algorithm was analyzed, and simulation data around typical near-field imaging geometry and aircraft size was generated. The completes near-field imaging in the range of 0.6 ~ 35 GHz was performed. Good imaging results confirm the correctness of the theoretical analysis and the proposed algorithm.

Keywords: aircraft; near-field imaging; synthetic aperture radar imaging; rotating model

飞行器的雷达隐身性能, 已经成为先进飞机的重要指标。^[1]

无人飞行器没有飞行员座舱、生命维持系统的约束, 其机身结构尺寸可以更小, 结构形式可以更为灵活, 结构材料也可以更为多元化。鉴于飞行器结构样式与材料构成与雷达隐身性能密切相关, 无人飞行器在结构和材料方面具有的灵活性, 使得无人飞行器相对于有人机具有更大的隐身性能优化空间。但也须重视, 无人飞行器具备的更为先进的复合材料、更为精细的外形结构使得基于缩比模型的测量与评估精度变差, 而外场全尺寸实物测试存在成本高昂、保密性差、精度受限、易受天气影响等特点, 不利于无人飞行器保持成本低廉、研发周期短等优势。因此, 在室内或者室外的较小区域内开展全尺寸无人飞行器的近场测量, 成为无人飞行器雷达散射特征分析的重要趋势^[1-2]。综合上述分析得知, 飞行器的极低雷达散射截面(radar cross section, RCS)设计与研制以及更为复杂工况下的 RCS 评估均需要近场测量技术的支撑。

事实上 RCS 是在远场条件下衡量目标电磁散射特性的物理量。在近距离开展 RCS 测量, 电磁波不满足远场条件, 此时的测量被称之为近场 RCS 测量。近场测试的核心技术是将近场测量数据转换(亦称外推)为远场数据, 并得到 RCS。从机理上看, 数据外推一般可分为两种技术路线: 基于成像原理的外推技术和基于成像结果的外推技术^[3]。基于成像结果的外推技术处理流程简

^{*} 收稿日期: 2022-03-29
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61801495); 湖南省科技创新计划资助项目(2021RC3077)
作者简介: 贾高伟(1989—), 男, 河南周口人, 副教授, 博士, E-mail: ji_as@126.com

洁,且可获得雷达图像用于散射特征诊断,是当前研究热点。从实现过程看,它可以包含两个阶段,首先是近场成像,然后是基于成像结果的 RCS 外推。

在基于远场假设(即平面波假设)的成像中,根据回波信号模型,回波数据可直接看作图像的谱域采样。因此成像过程可直接经坐标变换或插值后利用逆傅里叶变换实现。具体地,若以 ISAR 二维成像模式为例,以目标中心为原点建立极坐标系,某一散射点的 RCS 可以表示为 $\sigma(\rho, \varphi)$, ρ 为目标相关圆心距离, φ 为角度。一般地,成像过程可以表述为:

$$\sigma(\rho, \varphi) = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} E^F(f, \theta) \cdot \xi(f, \theta, \rho, \varphi) df d\theta \quad (1)$$

式中, f 是辐射频率, θ 是成像积累角, $E^F(f, \theta)$ 是远场回波数据, $\xi(f, \theta, \rho, \varphi)$ 为成像因子。由式(1)可知,像 $\sigma(\rho, \varphi)$ 与回波 $E^F(f, \theta)$ 之间满足傅里叶变换关系,即 $\sigma(\rho, \varphi) \Leftrightarrow E^F(f, \theta)$ 。

近场条件下,受球面波几何特征的影响,成像问题变得复杂。回波信号模型中相位与目标坐标位置不再是简单的由波数决定的线性关系。因此回波数据不能直接看成图像的谱域采样,而需经过更多的相位补偿和插值操作。但终究能够通过近场回波数据 $E^N(f, \theta)$ 得到目标的像 $\sigma(\rho, \varphi)$ 。这样通过像 $\sigma(\rho, \varphi)$ 就建立了近场回波与远场回波之间的联系^[3]。

基于上述介绍可知,近场成像的结果十分重要,直接影响 RCS 的外推,且近场成像结果能够以图像的形式直观地展示目标强散射点,在飞行器的设计、研制、定型、生产与使用过程中均具有重要意义。

结合成像理论可知,雷达天线相对目标的运动轨迹决定了成像算法的选择。当雷达天线相对于目标做直线运动时,传统的 SAR 成像算法^[4],如尺度变标算法(chirp scaling algorithm, CSA)、频率变标算法(frequency scaling algorithm, FSA)以及距离徙动算法(range migration algorithm, RMA)等均考虑了球面波前的影响,因而可以直接应用于近场条件下的精确成像。

但当扫描方式不是直线轨迹时,如转台成像,则上述算法均不再适用。转台成像是指雷达收发天线不动,目标放置在转台上并沿方位向旋转,该模式使用方便,易于实现对目标 360°全方位电磁散射测量,是评估飞行器电磁散射特性的常用测量模式。按照目标距离天线位置的不同,转台

成像又可分为近场条件和远场条件两类典型模式。

针对远场条件下的转台成像,高效率的成像算法包括距离多普勒算法(range Doppler algorithm, RDA)和极坐标格式算法(polar format algorithm, PFA)。RDA 适用于小转角成像,在观测时间内散射点的走动不超过一个分辨单元的情况下^[5],所获得的频率域目标信号的极坐标数据可近似被认为是直角坐标网格上的数据,对距离和方位向的数据分别进行傅里叶变换即可得到目标的雷达图像。PFA 对 RD 算法成像性能进行了拓展,不再将小角度的极坐标数据近似为直角坐标上的数据,而是通过极坐标采样将数据插值到具有均匀栅格的直角坐标系中,再利用二维傅里叶变换得到目标图像^[6]。

针对近场条件下的转台成像,现有的成像算法大多是时域算法。包括时域相关(time domain correlation, TDC)法、后向投影算法(back projection algorithm, BPA)等^[4],时域成像算法通常能够适用各类成像几何模型,但其不足是计算量大,成像用时长,对成像处理器要求高。频域处理算法方面, Soumekh 提出了一种基于系统核函数共轭转置的波前重建算法^[7]。该算法是基于傅里叶变换及匹配滤波的成像算法,其成立的理论条件是系统核函数满足正交性,能够实现斜距平面频谱向地平面频谱的精确投影。但当雷达辐射信号为宽带信号且成像场景较观测半径更大时,基于系统核函数共轭转置的频谱投影会带来相位误差,导致成像失败。概括地说,针对近场条件下的转台成像,现有的频域成像方法仍不成熟,急需新的成像方法在确保成像质量的前提下提高成像效率,这对快速完成相关飞行器的雷达散射特征诊断具有重要意义。

本文基于转台成像几何模型,以线性调频信号为辐射信号,建立了近场成像通用回波模型,基于驻定相位原理得到回波二维频谱解析形式,分析了近场条件下转台成像频域处理的难点,并结合工程实际,提出了近似处理方法。本文的工作着重分析近场条件下的转台成像频域算法,暂不涉及 RCS 校正与外推。

1 转台成像通用模型

1.1 转台成像几何模型与通用回波模型

转台成像中目标放置于转台之上,雷达收发机及天线固定,雷达天线相位中心(antenna phase

center, APC) 对应转台中心的下视角为 θ_z 。根据雷达运动-目标不动与雷达不动-目标运动的等效性,该成像模型如图 1 所示。

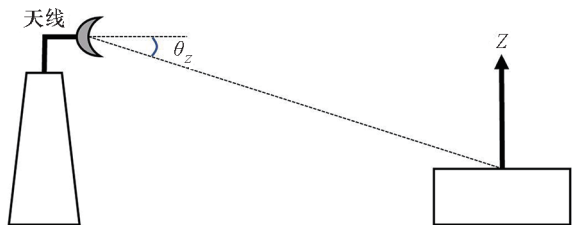


图 1 转台成像结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of rotating imaging

对于飞行器目标而言,其电磁散射来自局部效应的散射中心,且多散射中心的矢量合成散射场和雷达散射截面同理论计算得到的散射场以及雷达散射截面吻合较好^[8]。本文开展的成像算法分析同样基于散射点模型,考虑的成像策略是在一定角度内相干积累并假定在该积累角范围内散射点具有恒定的散射特性。成像算法致力于实现成像结果中散射点正确的空间位置分布与良好的聚焦质量。相关的成像几何模型定义为:

图 2 中 H 代表 APC 相对于转台的高度, R 代表雷达 APC 与转台中心的水平距离,等效为 APC 运动半径, R_a 代表转台上放置目标的最大半径。设雷达 APC 相对转台中心的旋转角为 θ , 相对于转台中心 O , 雷达 APC 的三维极坐标为 (R, θ, H) , 可以定义 $x_r = R\cos\theta$, $y_r = R\sin\theta$, 则 APC 的笛卡尔坐标为 (x_r, y_r, H) 。不失一般性, 设定转台上某散射点 P 坐标为 $(r, \varphi, 0)$, 可以等价表示为 $(x, y, 0)$, 其中 $x = r\cos\varphi$, $y = r\sin\varphi$ 。

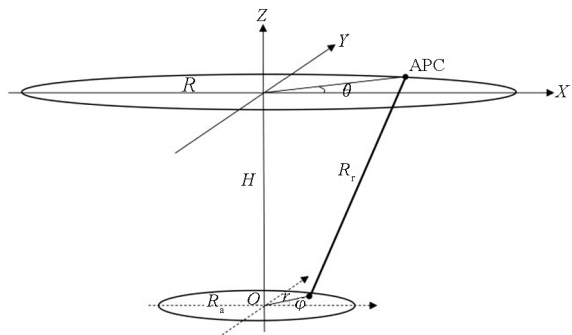


图 2 具体的近场转台成像几何模型

Fig. 2 Detailed imaging geometry model of near-field rotating imaging

基于图 2 所示成像几何模型,可以得到雷达 APC 同目标 P 之间的瞬时斜距为:

$$R_r = \sqrt{R^2 + r^2 + H^2 - 2Rr\cos(\theta - \varphi)} \quad (2)$$

设雷达发射信号为线性调频(linear frequency modulated, LFM)信号:

$$s(t) = \text{rect}\left[\frac{\hat{t}}{T_p}\right] \cdot \exp(j2\pi f_c t + j\pi\gamma\hat{t}^2) \quad (3)$$

式中, $\text{rect}[\cdot]$ 表示 LFM 信号的窗函数, f_c 和 γ 分别对应于 LFM 信号的载频和调频率, T_p 为 LFM 信号的持续时间, t 为时间变量, $\hat{t}$ 为快时间变量。经快时间傅里叶变换并匹配滤波后,目标 P 对应的雷达回波可以表示为:

$$S(k, \theta) = \frac{1}{R_r^2} \cdot \exp[-j2k \sqrt{R^2 + r^2 + H^2 - 2Rr\cos(\theta - \varphi)}] \quad (4)$$

式中, $1/R_r^2$ 表示电磁波近场条件下,辐射衰减正比于距离的平方值^[9],为便于后文公式推导与显示,用符号 A 表示回波信号强度。 $k = 2\pi(f_c + f)/c$ 表示距离向波数, f 为距离向频率。式(4)可以作为转台成像中雷达回波的通用形式。

1.2 回波频谱特性解析分析

对式(4)沿方位观测角 θ 进行傅里叶变换,可以得到:

$$S(k, \xi) = \int A \cdot \exp[-j2k \sqrt{R^2 + r^2 + H^2 - 2Rr\cos(\theta - \varphi)}] \cdot \exp(-j\xi\theta) d\theta \quad (5)$$

式中, ξ 为方位角度域波数,为简便计,下文均称之为角度波数。

针对式(5),基于驻定相位原理,可以通过求解式(6)来获取对应的驻定相位点^[10-11]。

$$\xi = -2kRr \frac{\sin(\theta - \varphi)}{\sqrt{a^2 - 2b\cos(\theta - \varphi)}} \quad (6)$$

式中, $\theta \in [0, 2\pi]$, $\varphi \in [0, 2\pi]$, $a^2 = R^2 + r^2 + H^2$, $b = Rr$ 。由式(6)可以得到驻定相位点 θ_1^* 和 θ_2^* , 分别满足:

$$\cos(\theta_1^* - \varphi) = \frac{\xi^2 + \sqrt{\xi^4 - 4k^2\xi^2a^2 + 16k^4b^2}}{4k^2b} \quad (7)$$

$$\cos(\theta_2^* - \varphi) = \frac{\xi^2 - \sqrt{\xi^4 - 4k^2\xi^2a^2 + 16k^4b^2}}{4k^2b} \quad (8)$$

由此可知,转台成像回波对应两个驻定相位点,其频谱由两部分组成,这同圆周 SAR 的信号频谱是相似的^[11],这也是转台成像在频域实现的难点所在。将由式(7)、式(8)求解得到的驻定相位点代入式(5),可以得到转台成像模式下雷达回波频谱在 (k, ξ) 域的代表形式为:

$$S(a, b, k, \xi) = S_I(a, b, k, \xi) + S_{II}(a, b, k, \xi) \quad (9)$$

式中, $S_I(a, b, k, \xi)$ 和 $S_{II}(a, b, k, \xi)$ 分别为不同

驻定相位点对应的子频谱^[11]。

$$\begin{cases} S_I(a, b, k, \xi) \\ = A \cdot \exp(-j\sqrt{4k^2a^2 - 2\xi^2 - 2\sqrt{\xi^4 - 4k^2\xi^2a^2 + 16k^4b^2}}) \cdot \\ \exp\left[j|\xi|\arccos\left(\frac{\xi^2 + \sqrt{\xi^4 - 4k^2\xi^2a^2 + 16k^4b^2}}{4k^2b}\right)\right] \exp(-j\xi\varphi) \\ S_{II}(a, b, k, \xi) \\ = A \cdot \exp(-j\sqrt{4k^2a^2 - 2\xi^2 + 2\sqrt{\xi^4 - 4k^2\xi^2a^2 + 16k^4b^2}}) \cdot \\ \exp\left[j|\xi|\arccos\left(\frac{\xi^2 - \sqrt{\xi^4 - 4k^2\xi^2a^2 + 16k^4b^2}}{4k^2b}\right)\right] \exp(-j\xi\varphi) \end{cases} \quad (10)$$

针对 $S_I(a, b, k, \xi)$ 和 $S_{II}(a, b, k, \xi)$, 可以分别构造对应的水平面频谱形式: $S_{I_g}(a, b, k, \xi)$ 和 $S_{II_g}(a, b, k, \xi)$, 记为:

$$\begin{cases} S_{I_g}(R, r, k, \xi) \\ = A \cdot \exp(-j\sqrt{4k^2R^2\cos^2\theta_z - \xi^2}) \exp(j\sqrt{4k^2r^2\cos^2\theta_z - \xi^2}) \cdot \\ \exp\left[-j\xi\arcsin\left(\frac{\xi}{2kR\cos\theta_z}\right)\right] \exp\left[j\xi\arcsin\left(\frac{\xi}{2kr\cos\theta_z}\right)\right] \cdot \\ \exp(-j\xi\varphi) \\ S_{II_g}(a, b, k, \xi) \\ = A \cdot \exp(-j\sqrt{4k^2R^2\cos^2\theta_z - \xi^2}) \exp(-j\sqrt{4k^2r^2\cos^2\theta_z - \xi^2}) \cdot \\ \exp(-j\xi\pi) \exp\left[-j\xi\arcsin\left(\frac{\xi}{2kR\cos\theta_z}\right)\right] \exp(-j\xi\varphi) \cdot \\ \exp\left[-j\xi\arcsin\left(\frac{\xi}{2kr\cos\theta_z}\right)\right] \end{cases} \quad (11)$$

结合圆周 SAR 成像方面的研究成果^[10], 将斜距平面对应的频谱转换为水平面频谱是关键环节, 后续的成像处理可以通过频域处理高效率完成。一种朴素的处理思想是对 $S_I(a, b, k, \xi)$ 和 $S_{II}(a, b, k, \xi)$ 分别进行相位补偿 $\Omega_I(a, b, k, \xi)$ 和 $\Omega_{II}(a, b, k, \xi)$, 即可得到 $S_{I_g}(a, b, k, \xi)$ 和 $S_{II_g}(a, b, k, \xi)$ 。

将 $S_{I_g}(a, b, k, \xi)$ 与 $S_{II_g}(a, b, k, \xi)$ 通过因式分解, 总的频谱形式 $S_g(R, r, k, \xi)$ 可以重写为:

$$\begin{aligned} S_g(R, r, k, \xi) &= S_{I_g}(a, b, k, \xi) + S_{II_g}(a, b, k, \xi) \\ &= A \cdot \exp(-j\sqrt{4k^2R^2 - \xi^2}) \exp(j\sqrt{4k^2r^2 - \xi^2}) \exp(-j\xi\varphi) \cdot \\ &\quad \exp\left[-j\xi\arcsin\left(\frac{\xi}{2kR}\right)\right] \exp\left[j\xi\arcsin\left(\frac{\xi}{2kr}\right)\right] + \\ &\quad A \cdot \exp(-j\sqrt{4k^2R^2 - \xi^2}) \exp(-j\sqrt{4k^2r^2 - \xi^2}) \exp(-j\xi\pi) \cdot \\ &\quad \exp(-j\xi\varphi) \exp\left[-j\xi\arcsin\left(\frac{\xi}{2kR}\right)\right] \exp\left[-j\xi\arcsin\left(\frac{\xi}{2kr}\right)\right] \end{aligned} \quad (12)$$

但在实际的相位补偿处理操作中, 需要获知

相位项 $\Omega_I(a, b, k, \xi)$ 和 $\Omega_{II}(a, b, k, \xi)$ 的解析表达式。以 $\Omega_I(a, b, k, \xi)$ 为例, 理论上它的取值等于 $S_I(a, b, k, \xi)$ 与 $S_{I_g}(a, b, k, \xi)$ 的相位差, 对比观察式 (10) 和式 (11) 可知, $\Omega_I(a, b, k, \xi)$ 项与目标半径 r 以及角波数 ξ 有关, 那么 $\Omega_I(a, b, k, \xi)$ 项的补偿将是距离及角度空变的, 精确的相位补偿效率将很低。一种工程化的处理思路是针对飞行器的近场成像, 重点考虑成像几何模型的特殊性, 引入近似条件, 简化处理流程。

结合图 1, 常规飞行器一般是纵横向较大, 高度向较小, 雷达 APC 与转台高度差不大, 即 H 值通常较小^[12]; 飞行器结构复杂, 一般不满足散射中心各向同性且无迁移现象, 其 RCS 具有明显的方位空变性。本文分析的前提是散射点在一定成像积累角度内具有恒定的散射特性。若成像积累角过大, 则散射特性恒定的假设不再成立^[13-14], 因此有必要约束成像的积累角。

上述关于成像几何模型特殊性的描述可以等价: θ_z 较小且成像积累角 Θ 较小。在这样的成像约束下, 结合美国 Howland 公司^[15] 以及意大利 IDS 公司开发的 RCS 近场测量系统^[16], 设定飞行器近场成像几何模型参数, 如表 1 所示。

表 1 成像参数设定

Tab. 1 Setting of imaging parameters

参数	取值/m
R	30
H	5
R_a	15

结合表 1, 当雷达波中心频率为 0.6 GHz 时, 补偿函数 $\Omega_I(a, b, k, \xi)$ 和 $\Omega_{II}(a, b, k, \xi)$ 对应的相位值如图 3 所示。由图 3 可知, 在 360° 全孔径范围内, 补偿函数 $\Omega_I(a, b, k, \xi)$ 和 $\Omega_{II}(a, b, k, \xi)$ 变化范围大, 非线性特点明显, 不利于进行泰勒级数展开或者高次函数拟合, 因此针对 $\Omega_I(a, b, k, \xi)$ 和 $\Omega_{II}(a, b, k, \xi)$ 的精确补偿是困难的。相应地, 一种直观的处理办法是通过子孔径处理限制相位误差, 即设定子孔径宽度 θ_{sub} (等同于成像积累角 Θ), 在子孔径内, 如果相位补偿函数对应的相对误差小于 $\pi/4$, 则可以忽略相位补偿函数对成像的影响, 并不再补偿。直观地理解, 即是斜距平面谱 $S(a, b, k, \xi)$ 近似为水平面频谱 $S_g(a, b, k, \xi)$, 从而忽略了频谱的投影处理。

以表 1 为基础, 在 0.6 ~ 35 GHz 的频率范围内, 以相位相对变化值不超过 $\pi/4$ 为约束, 可以

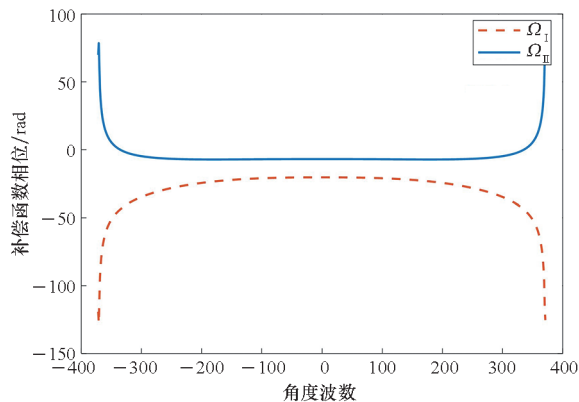


图 3 补偿函数相位随角度波数的变化趋势

Fig. 3 Phase of compensation function variations according to angular wavenumber

得到不同频段条件下适合的子孔径宽度选定范围,如图 4 所示。图 4 中,横坐标为允许采用的子孔径宽度,纵坐标对应不同的雷达中心频率,图中黄色区域代表子孔径宽度的可行域。直观地,当雷达中心频率低时,所允许的子孔径宽度更大,当雷达中心频率增高,对应的子孔径宽度不断减小。

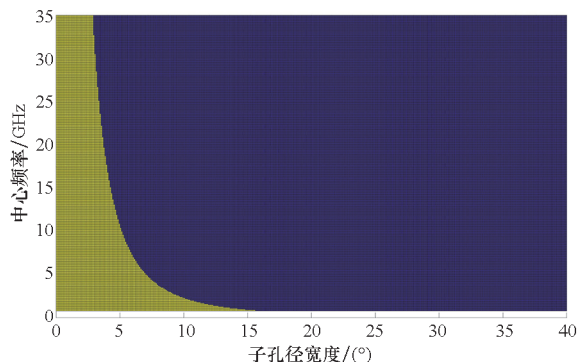


图 4 针对不同频段可采用的子孔径频段宽度

Fig. 4 Acceptable width of sub-aperture according to different wavebands

基于上述处理思路形成本文的成像策略,即采用子孔径处理(等效为小转角)获得雷达图像,并通过处理一系列子孔径数据,评估飞行器全方位的散射特性。

2 频域算法处理流程

结合第 1 节的理论分析,总结得到近场频域处理流程如图 5 所示。

图 5 中,对于数据采集得到的回波矩阵 $s(\hat{t}, \theta)$, 经过径向匹配滤波及沿转角 θ 维快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT), 得到二维频域信号 $S(k, \xi)$, 随后进行空不变匹配滤波, 对应补偿函数为 $H_{\text{inv}}(k, \xi)$, 其表达式如式(13)所示。

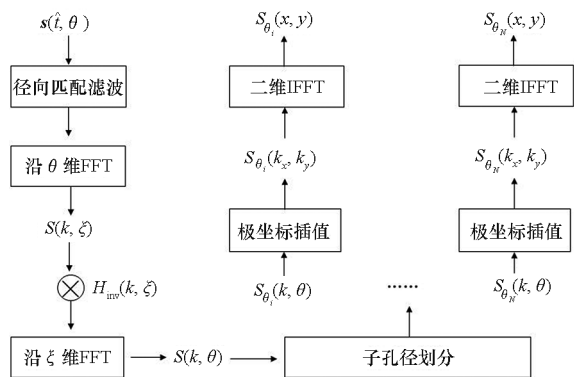


图 5 本文算法的成像处理流程

Fig. 5 Imaging procedure of the proposed method

$$H_{\text{inv}}(k, \xi) = \exp(j\sqrt{4k^2 R^2 - \xi^2}) \exp\left[j\xi \arcsin\left(\frac{\xi}{2kR}\right)\right] \quad (13)$$

经 $H_{\text{inv}}(k, \xi)$ 补偿后, 式(12)演变得到:

$$\begin{aligned} S'_g(R, r, k, \xi) &= A \cdot \exp(j\sqrt{4k^2 r^2 - \xi^2}) \exp(-j\xi\varphi) \exp\left[j\xi \arcsin\left(\frac{\xi}{2kr}\right)\right] + \\ &A \cdot \exp(-j\sqrt{4k^2 r^2 - \xi^2}) \exp(-j\xi\pi) \exp(-j\xi\varphi) \cdot \\ &\exp\left[-j\xi \arcsin\left(\frac{\xi}{2kr}\right)\right] \end{aligned} \quad (14)$$

将 $S'_g(R, r, k, \xi)$ 关于 ξ 进行逆快速傅里叶变换(inverse fast Fourier transform, IFFT)^[11], 得到方位时域信号:

$$S(k, \theta) = A \cdot \exp(j2kr \cos\theta_z \cos\theta \cos\varphi) \cdot \exp(j2kr \cos\theta_z \sin\theta \sin\varphi) \quad (15)$$

对 $S(k, \theta)$ 进行子孔径划分, 得到 $S_{\theta_i}(k, \theta)$, θ_i ($i \in [1, N]$) 对应不同的子孔径积累角(不同的转角区间); 随后进行式(16)所示极坐标插值得到 $S_{\theta_i}(k_x, k_y) = \exp(jk_x r \cos\varphi) \exp(jk_y r \sin\varphi)$; 再经过二维 IFFT 得到子孔径图像; 通过对序列子孔径图像的后续处理, 可得到不同转角区间对应的飞行器近场成像结果。

$$\begin{cases} k_x = -2k \cos\theta_z \cos\theta \\ k_y = -2k \cos\theta_z \sin\theta \end{cases} \quad (16)$$

值得特意说明的是, 在实际的应用中, 应考虑近场测量中天线方向图引起的锥削现象, 否则将引入较大的幅值误差^[17-18]。鉴于本文关注于高效精确成像算法, 暂不涉及 RCS 外推与校正, 因此文中的分析未考虑天线方向图的影响。

3 数值分析

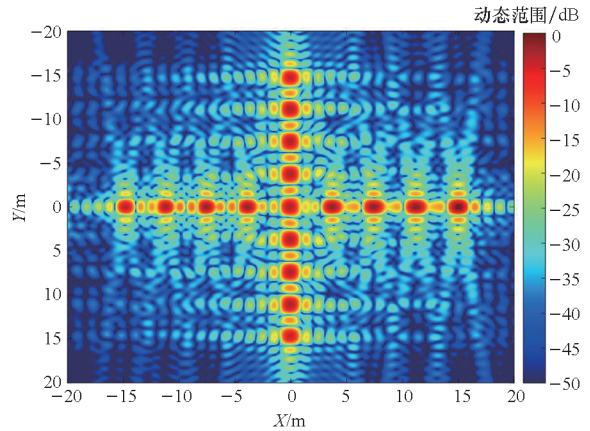
在表 1 所示成像参数的基础上, 设定如表 2 所示的典型成像参数, 开展仿真数据的成像分析。

表 2 典型成像参数设定

Tab. 2 Setting of the typical imaging parameters

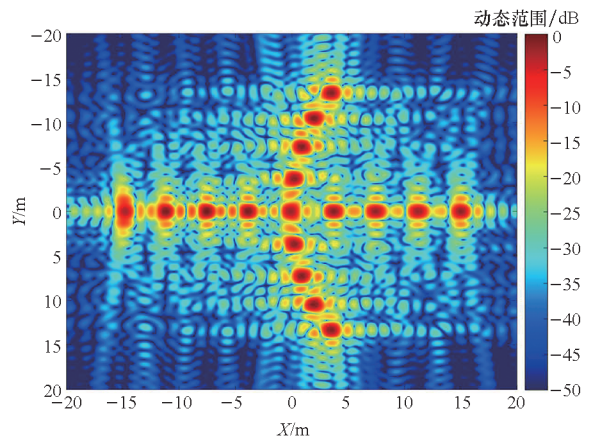
模式	中心频率/ GHz	带宽/ MHz	积累角/ (°)	转角范围/(°)
1	0.6	150	14	83.0 ~ 97.0
2	3.2	500	9	85.5 ~ 94.5
3	10.0	800	5	87.5 ~ 92.5
4	35.0	1 500	3	88.5 ~ 91.5

鉴于人们习惯于对径向与横向呈正交状态的图像进行评估,表 2 中 4 类模式的转角区间均以 90°为中心,并采用 PFA 和 BPA 对比不同算法的成像结果。边缘散射点对应最大的成像半径。图 6 展示了模式 1 对应的成像结果,图 6(a)表示利用本文算法处理得到的散射点成像结果;图 6(b)对应 PFA 处理得到的成像结果;图 6(c)代表图 6(a)中边缘点(0 m, -15 m)对应的点散布函数分布;图 6(d)为图 6(a)中边缘点(0 m, -15 m)对应的 BPA 成像结果;图 6(e)为图 6(a)的频谱支撑域;图 6(f)和(g)分别表示图 6(c)所示点散布函数沿横向(Y)和径向(X)的剖面图。



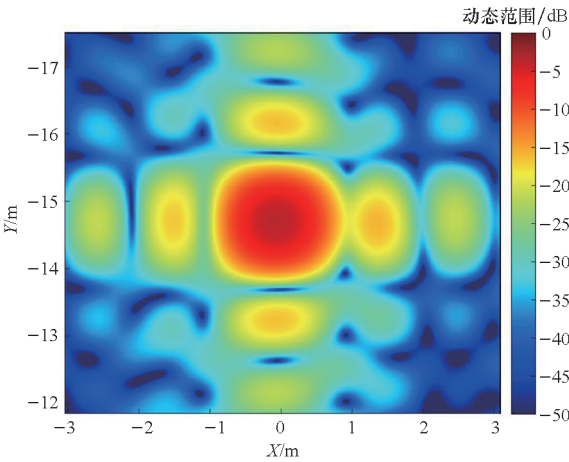
(a) 本文方法得到的结果

(a) Result produced by the proposed algorithm



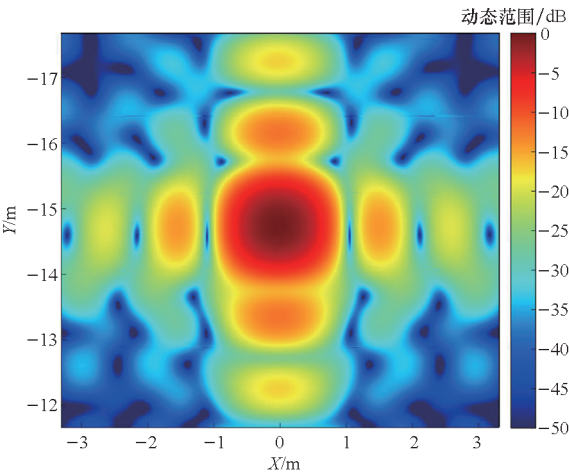
(b) PFA 处理得到的成像结果

(b) Imaging result produced by the PFA



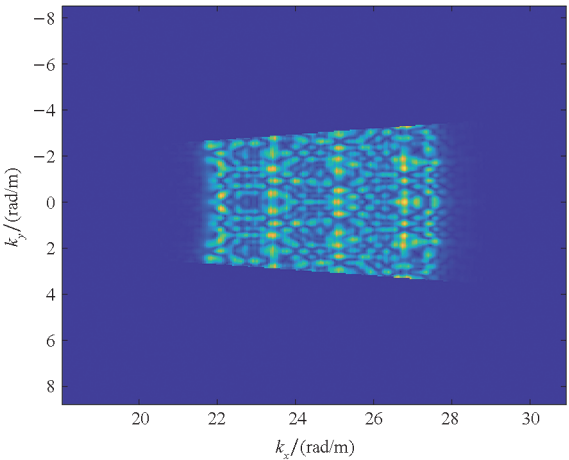
(c) 点目标成像结果的放大展示

(c) Enlarged display of point target imaging result



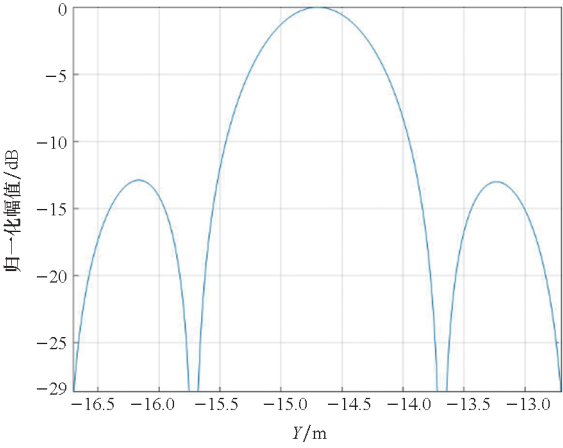
(d) 针对图 6(c)点目标利用 BPA 得到的结果

(d) BPA result according to the target
shown in figure 6(c)

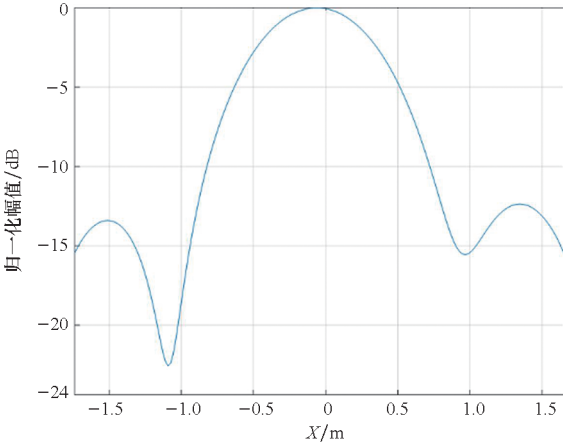


(e) 子孔径数据对应的频谱形状

(e) Spectrum shape according to the sub-aperture data



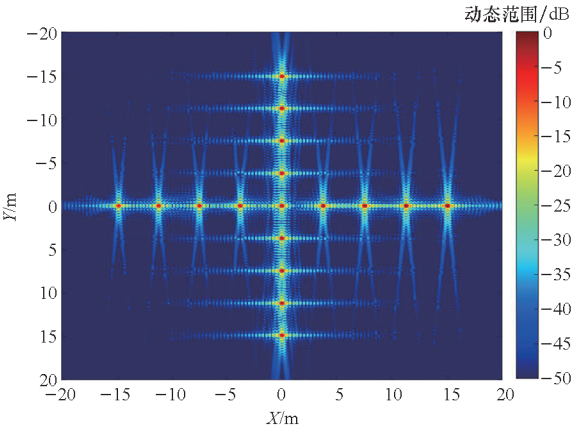
(f) 沿 Y 方向的剖面图
(f) Profile in direction of Y



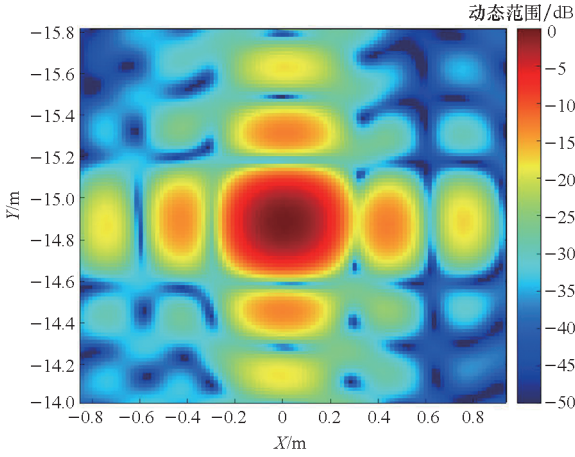
(g) 沿 X 方向的剖面图
(g) Profile in direction of X

图 6 模式 1 对应成像结果及对比图
Fig. 6 Imaging results and detailed comparison according to model 1

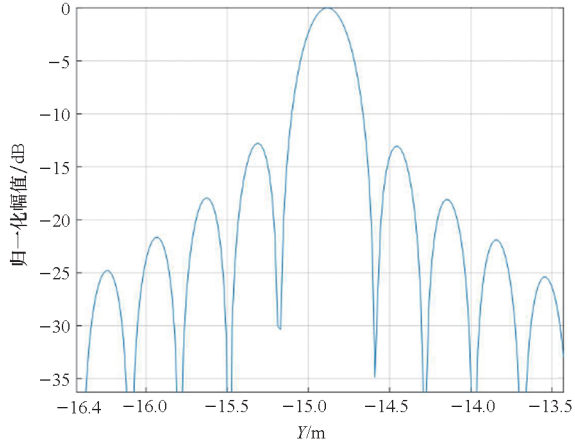
类似地,图7、图8、图9 分别展示了模式2、模式3、模式4 对应的成像结果。



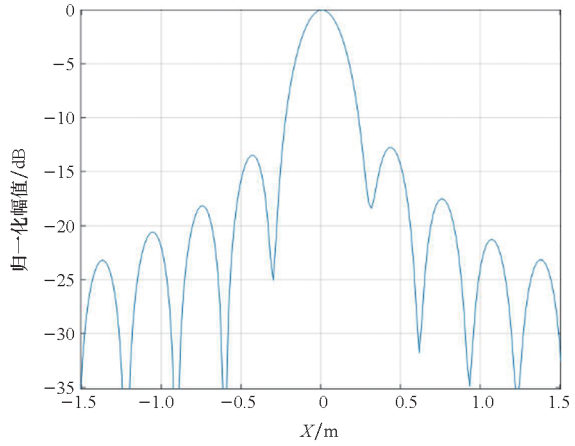
(a) 本文方法得到的结果
(a) Result produced by the proposed algorithm



(b) 点目标成像结果的放大展示
(b) Enlarged display of point target imaging result



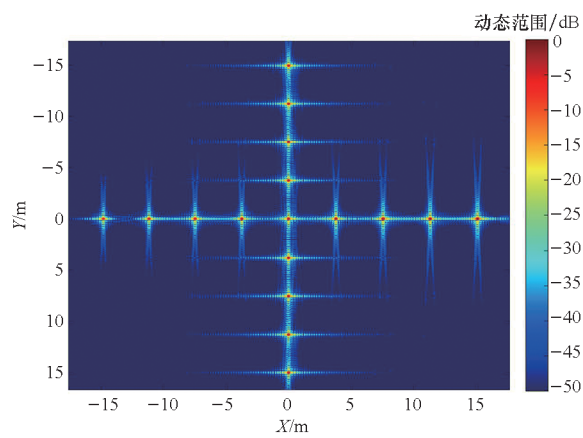
(c) 沿 Y 方向的剖面图
(c) Profile in direction of Y



(d) 沿 X 方向的剖面图
(d) Profile in direction of X

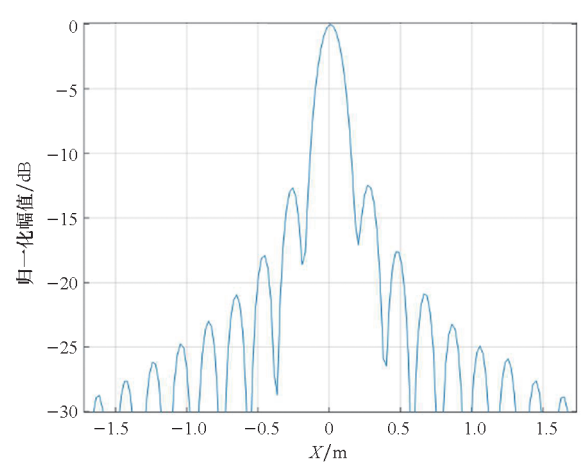
图 7 模式 2 对应成像结果

Fig. 7 Imaging results according to model 2



(a) 本文方法得到的结果

(a) Result produced by the proposed algorithm

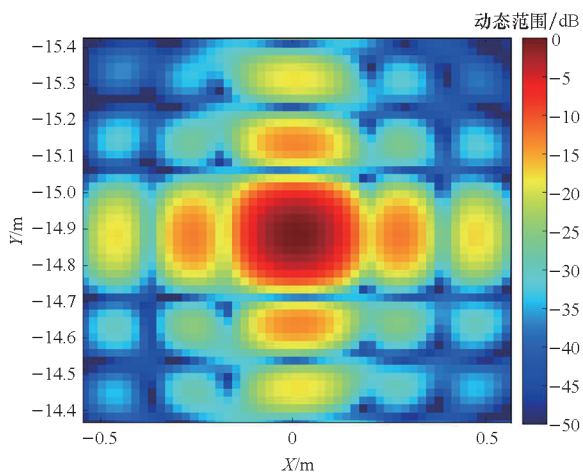


(d) 沿 X 方向的剖面图

(d) Profile in direction of X

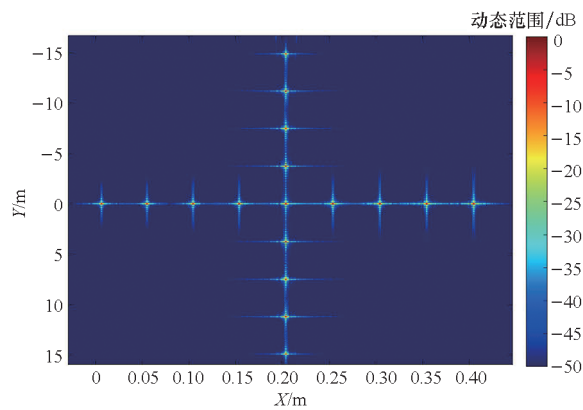
图 8 模式 3 对应成像结果

Fig. 8 Imaging results according to model 3



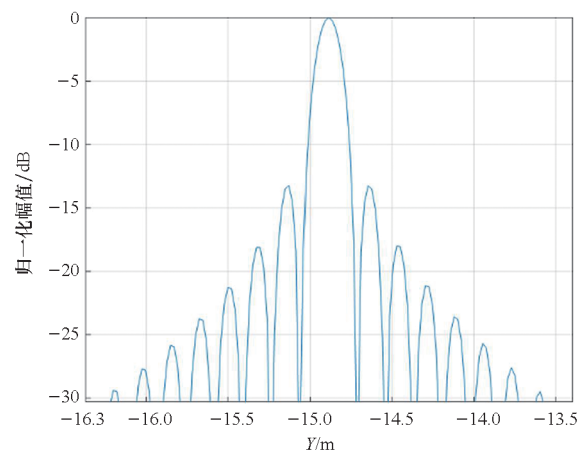
(b) 点目标成像结果的放大展示

(b) Enlarged display of point target imaging result



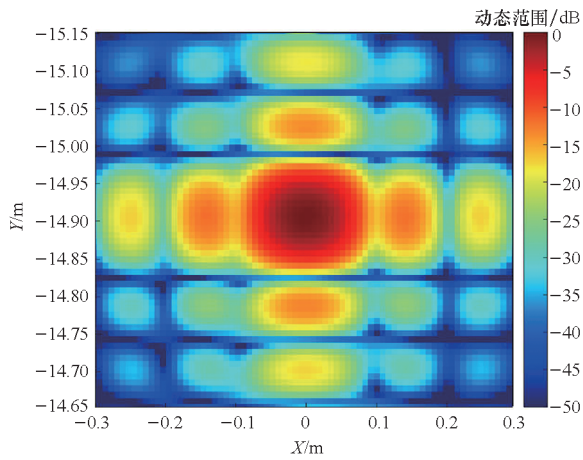
(a) 本文方法得到的结果

(a) Result produced by the proposed algorithm



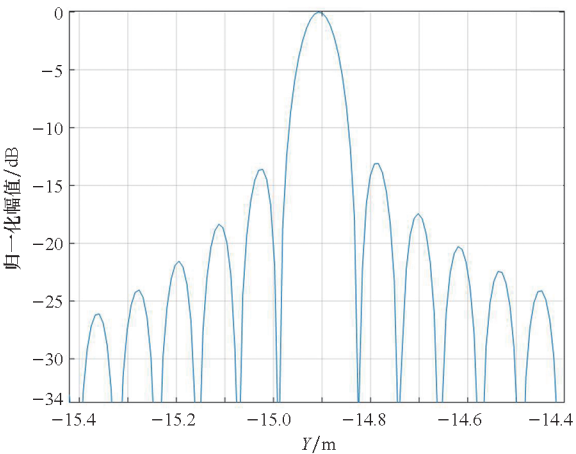
(c) 沿 Y 方向的剖面图

(c) Profile in direction of Y

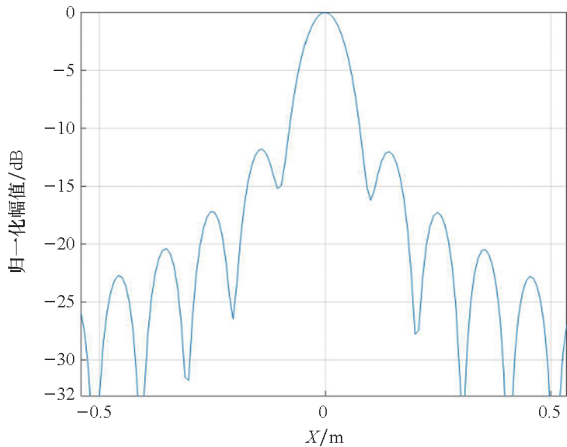


(b) 点目标成像结果的放大展示

(b) Enlarged display of point target imaging result



(c) 沿 Y 方向的剖面图
(c) Profile in direction of Y



(d) 沿 X 方向的剖面图
(d) Profile in direction of X

图 9 模式 4 对应成像结果

Fig. 9 Imaging results according to model 4

针对图 6~9 所示剖面图,统计分辨率、峰值旁瓣比等成像质量参数,如表 3 所示。

表 3 成像结果的详细分析

Tab. 3 Detailed analysis of imaging result

模式	径向			横向		
	理论	实测	峰值	理论	实测	峰值
	分辨率/m	分辨率/m	旁瓣比/dB	分辨率/m	分辨率/m	旁瓣比/dB
1	0.886	0.890	-12.4	0.908	0.905	-13.0
2	0.266	0.271	-12.9	0.265	0.263	-12.9
3	0.166	0.169	-12.6	0.152	0.152	-13.2
4	0.087	0.090	-12.0	0.072	0.073	-13.1

由图 6(a)与图 6(b)对比可知,随着观测半径的增大,PFA 成像质量下降,并存在明显的位置偏移,这同 PFA 需满足远场条件的前提是吻合

的;由图 6(c)和图 6(d)对比可知,本文方法得到的成像结果与 BPA 基本一致;表 3 所示成像量化分析证实本文方法处理得到的成像结果同理论值吻合。仿真成像分析证实了成像流程的可行性和鲁棒性。

观察图 6~9,总体上看,在子孔径成像策略下,点散布函数基本上是二维可分离的 sinc 函数,这从频谱支撑域的形状上也可以看出。但也应注意到有所差异:

首先,点散布函数的 Y 向剖面图中,右侧第一旁瓣略高,主瓣与第一旁瓣之间的谷峰电平较理想值高,该现象同采样间隔、插值精度、近似引入的相位误差以及频谱支撑域的形状是否为规则的矩形均相关,但图示结果在实际应用中是可接受的。

其次,在散射点的定位方面,与理想值之间存在较小的偏差,偏差的引入主要由插值处理造成且通常为固定偏差,当偏差值小于分辨率时可以忽略它的影响,也可以进行一致性的校正。

4 结论

结合全尺寸飞行器在室内或者室外较小区域进行雷达散射特征诊断的迫切需要,本文通过简要对比,分析了近场成像的特点,介绍了近场成像算法的研究现状。针对转台成像模型,以获得近场雷达图像为目的,建立了适用于飞行器电磁散射特征诊断的近场成像通用模型,分析了近场测量回波的频谱形式,理论上阐述了转台成像模式下频域成像处理的难点和挑战。针对近场转台成像的典型几何模型,本文基于散射点在较小角域范围内近似恒定的假设,提出了一种频域快速成像算法,并分别针对典型波段进行数值仿真分析。良好的成像质量证实了本文所提出的理论分析与成像算法的可行性。需要指出的是,本文的研究,侧重于成像聚焦质量和近场雷达图像的获取,未考虑天线方向图锥削效应的影响,以及 RCS 的标定与外推。

参考文献(References)

[1] 桑建华. 飞行器隐身技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2013.
SANG J H. Low-observable technologies of aircraft[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2013. (in Chinese)
[2] 张澎, 车理论, 马永利, 等. 国外隐身飞机 RCS 近场测试技术[J]. 飞机设计, 2019, 39(4): 15-19.
ZHANG P, CHE L L, MA Y L, et al. Foreign RCS near-field measurement technology for stealth aircraft[J]. Aircraft Design, 2019, 39(4): 15-19. (in Chinese)

[3] 贾高伟, 阴鹏, 邵帅, 等. 隐身飞机 RCS 测量与成像方法研究综述[J]. 国防科技大学学报, 2022, 44(3): 93–103.
JIA G W, YIN P, SHAO S, et al. Review of RCS measurement and imaging methods of stealth aircraft[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2022, 44(3): 93–103. (in Chinese)

[4] 高敬坤. 阵列三维成像及雷达增强成像技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2018.
GAO J K. Research on array-based 3D imaging and enhanced radar imaging techniques[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018. (in Chinese)

[5] 张麟兮, 李南京, 胡楚锋, 等. 雷达目标散射特性测试与成像诊断[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2009.
ZHANG L X, LI N J, HU C F, et al. Radar target scattering characteristics test and imaging diagnosis[M]. Beijing: China Aerospace Publishing House, 2009. (in Chinese)

[6] 付强, 周剑雄, 秦敬喜, 等. 雷达目标散射中心模型反演及其在识别中的应用[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(1): 48–52.
FU Q, ZHOU J X, QIN J X, et al. Global scattering center model extraction and its application in radar target recognition[J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(1): 48–52. (in Chinese)

[7] SOUMEKH M. Reconnaissance with slant plane circular SAR imaging[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1996, 5(8): 1252–1265.

[8] 王洪帅. 雷达散射截面的测量与转台成像研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015.
WANG H S. RCS measurements and study of turntable imaging[D]. Xi'an: Xidian University, 2015. (in Chinese)

[9] VOLAKIS J Y. Antenna engineering handbook[M]. New York: McGraw-Hill Professional Publishing, 2007.

[10] 贾高伟, 常文革. 圆周 SAR 子孔径频域成像处理方法研究[J]. 电子学报, 2016, 44(3): 497–504.
JIA G W, CHANG W G. Fourier-based sub-aperture imaging algorithm for circular synthetic aperture radar[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(3): 497–504. (in Chinese)

[11] 贾高伟. 无人机载微型 SAR 高分辨成像技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2015.
JIA G W. Study on the high resolution imaging techniques for UAV airborne mini-SAR[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015. (in Chinese)

[12] 柴建忠, 高旭. 基于近场测量系统的飞机 RCS 诊断评估技术[C]//中国航空学会总体专业分会飞机发展与设计第十次学术交流会, 2015: 383–386.
CHAI J Z, GAO X. Diagnosis and evaluation technology of aircraft RCS based on near-field measurement system[C]//Proceedings of the 10th Academic Exchange Conference of Aircraft Development and Design of General Professional Branch of China Aviation Society, 2015: 383–386. (in Chinese)

[13] 许小剑. 如何理解目标高分辨率雷达图像及其像素值[J]. 电波科学学报, 2019, 34(1): 33–44.
XU X J. How to understand high resolution radar images and the pixel values of targets[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2019, 34(1): 33–44. (in Chinese)

[14] 许小剑, 刘永泽. MIMO 雷达三维干涉诊断成像方法[J]. 雷达学报, 2018, 7(6): 655–663.
XU X J, LIU Y Z. Three-dimensional interferometric MIMO radar imaging for target scattering diagnosis[J]. Journal of Radars, 2018, 7(6): 655–663. (in Chinese)

[15] Howland Company. Radar cross section (RCS) facilities[EB/OL]. [2022–01–10]. <https://thehowlandcompany.com/design-consulting/>.

[16] The IDS Corporation. RCSMS static RCS measurement system[EB/OL]. [2022–01–10]. <http://www.idscorporation.com/pdf/rcsms/>.

[17] BENOUDIBA-CAMPANINI T, GIOVANNELLI J F, MINVIELLE P. SPRITE: 3-D sparse radar imaging technique[J]. IEEE Transactions on Computational Imaging, 2020, 6: 1059–1069.

[18] BENOUDIBA-CAMPANINI T, MINVIELLE P, MASSALOUX P, et al. A new regularization method for radar cross section imaging[C]//Proceedings of 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), 2017.